

충돌 합성 제트의 와류 이송 특성 분석

김무성* · 이훈상* · 황원태†

Characterization of Vortex Advection from a Synthetic Jet Impinging on a Wall

MuSeong Kim*, HoonSang Lee* and Wontae Hwang†

Abstract Impingement cooling utilizing synthetic jets is emerging as a popular cooling technique because of its high local cooling efficiency. The interaction between the vortex structure of the synthetic jet and the surface is crucial in understanding the mechanism of this technique. In this study, the impinging vortex structure and its advection are investigated by experiments with jet-to-surface spacing $2 \leq H/D \leq 7$, and synthetic jet Reynolds number $5120 \leq Re \leq 9050$. Using phase-locked particle image velocimetry, ensemble averaged (phase averaged) flow fields are obtained, and vortex identification and quantification techniques are applied. The shape, trajectory, and intensity change of the vortex are assessed. A sharp decline in the vortex intensity and the occurrence of a counter-rotating vortex at the impingement point are observed.

Key Words : Synthetic Jet (합성 제트), Jet Impingement (제트 충돌), Particle Image Velocimetry (입자 영상 유속계), Vortex Advection (와류 이송)

기호설명

D : Jet orifice diameter

f : Jet frequency

H : Jet-to-surface spacing

L_0 : Jet stroke length

Re : Reynolds number

Q : 2D simplification for Q_{3D}

Q_{3D} : Second invariant of velocity gradient tensor

r : Radial coordinate

S : Strain rate tensor

T : Jet period

t : Time

U_0 : Averaged jet velocity

$U_m(t)$: Mean instantaneous jet velocity

u, v : Horizontal and vertical velocity

x, y : Horizontal and vertical coordinate

Γ : Circulation

ν : Kinematic viscosity (air)

φ, φ_0 : Phase and reference phase

Ω : Vorticity tensor

ω : Out-of-plane vorticity

† Corresponding author:

Department of Mechanical & Aerospace Engineering, Seoul National University
Institute of Advanced Machines and Design, Seoul National University
E-mail: wthwang@snu.ac.kr

* Department of Mechanical & Aerospace Engineering, Seoul National University

1. 서론

충돌 제트 냉각 기법 (Jet impingement cooling)은 제트 유동을 고온부에 수직한 방향으로 충돌시켜 이를 냉각시키는 기법이다. 산업 현장에서는 고온에 의한 기기의 고장, 파손, 성능의 감소 등의 문제가 빈번하게 발생하기 때문에 충돌 제트 냉각 기법을 활용하여 국부적 영역에 집중적인 냉각을 수행하고 있다. 그 쓰임새는 집적화된 마이크로 전자기기에서부터 가공, 절단 공정, 가스 터빈 블레이드 내부 냉각까지 다양하게 나타나고 있다^(1,4).

충돌 냉각 기법에 사용되는 제트가 시스템 외부에서 공기를 주입하는 방식인 경우, 이를 연속 충돌 제트 (continuous impinging jet)라고 한다. 연속 충돌 제트에서는 압축기 혹은 팬 (fan)을 이용하여 제트 유동을 발생시킨다^(3,4). Jambunathan⁽⁵⁾은 충돌하는 제트를 다음의 4가지 영역으로 나누었다. 제트가 발달되는 initial mixing region, 축방향 속도가 감소하는 established jet zone, 축방향 속도가 급격히 감소하고 정압 (static pressure)이 상승하는 deflection zone, 벽 근처에서 반경방향 속도가 최대가 되는 wall jet region. 그는 wall jet region에서 제트 유동과 바깥 대기 사이에서 발생하는 전단 (shear)과 이에 따라 생성되는 난류에 의해, 경계층 (boundary layer)에서 열전달이 더욱 효과적으로 일어남을 보였다.

한편 합성 제트는 연속 제트와는 다르게 시스템 내부의 작동 유체를 이용하여 유동을 형성한다. Fig. 1은 스피커를 이용한 합성 제트의 작동 원리를 모식도로 나타낸 것이다. Fig. 1(a)와 같이 스피커의 진동판이 아래로 당겨지면 시스템 내의 작동 유체는 공동 (cavity)으로 유입된다. 이후 진동판이 이를 밀어내면서 제트 유동이 발생하게 된다 (Fig. 1(b)). 따라서, 시스템 내 총 질량속 (net mass flux) 없이 선형 모멘텀속 (linear momentum flux) 만을 주기적으로 발생시키는 특성을 가진다⁽⁶⁾. 합성 제트는 장치와 작동이 간단하며 팬을 이용한 방법보다 열 제거 효율이 좋고 fouling 문제가 적은 등 많은 장점을 가지기 때문에 최근에는 이를 이용한 냉각 방식

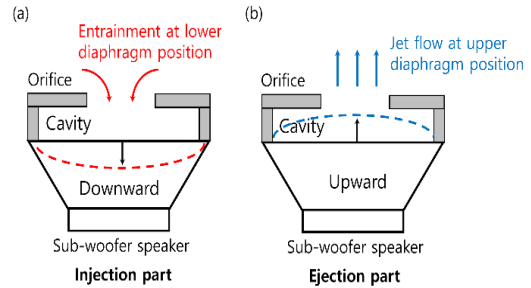


Fig. 1. Working principle of synthetic jet

이 이목을 끌고 있다. 이에 따라 합성 충돌 제트에 관한 다양한 연구가 수행되고 있다⁽⁷⁾.

Chaudhari⁽⁸⁾는 충돌 합성 제트에서 열전달 특성 분석을 수행하였다. 열선 유속계와 열전대를 이용하여 얻은 데이터를 기반으로, 레이놀즈 수 (Re), 프란틀 수 (Pr), 그리고 여러 지형 변수에 의한 너셀 수 (Nu)의 변화를 수식으로 표현하였다. 그는 오리피스 (orifice) 직경으로 무차원화된 오리피스부터 표면까지의 거리 (H/D)가 작을수록 합성 제트의 열전달 효율이 떨어짐을 확인하였다. 그는 이 현상을 H/D 가 작을수록 합성 제트가 흡입, 방출 과정에서 이전 냉각에 사용된 같은 유체를 다시 사용하게 되는 “유체의 재순환 (recirculation)”으로 설명하였다. 이 예시는 제트와 충돌판 사이에서 발생하는 순환 현상이 열전달에 큰 영향을 미칠 수 있음을 보여준다.

Pavlova⁽⁹⁾는 합성 제트의 구동 주파수, 레이놀즈 수, H/D 를 변화시키며 열효율과 냉각 메커니즘에 미치는 영향을 관찰하였다. H/D 가 작을 때에는 높은 구동 주파수인 경우가 작은 주파수인 경우보다 효율적인 열 제거가 가능하였다. 반대로 거리가 길 때에는 작은 주파수에서 열 제거 효율이 높게 나타났다. 그는 입자 영상 유속계 (particle image velocimetry, PIV)를 이용하여 이러한 현상이 와류의 병합이나 break down에 의한 작은 스케일 고유 구조 (small scale coherent structure) 발생에 의한 것임을 밝혔다. 또한 그는 같은 지형과 레이놀즈 수 조건에서 연속 제트와 합성 제트의 열전달 효율을 비교하였다. 합성 제트는 연속 제트에 비해 약 3배가량 높은 냉각 성능을 보였다. 그는 합성 제트에서 발생하는

entrainment가 일반적인 연속 제트에 비해 더욱 향상되고, 와류 고리 (vortex ring)의 존재가 열 제거 효율 향상의 원인이 됨을 밝혔다.

위 선행 연구들의 사례를 미루어 볼 때, 합성 제트에 의한 열전달 메커니즘을 이해하기 위해서는 고온 표면 위에서 대류되는 와류 구조 (vortex structure)에 대한 이해가 필수적이다^{9, 10}. 와류가 제트 출구 오리피스에서 발생한 후 표면까지 대류되는 경로와 표면에 충돌 직후 어떠한 거동을 보이는지 면밀히 분석해 볼 필요가 있다. 이러한 연구는 Valiorgue⁽¹¹⁾에 의해 시도된 바가 있으나 그의 연구는 *H/D*가 매우 작은 하나의 케이스에만 국한되어 있었으며, 위상 분해 (phase resolved)를 위한 앙상블 평균 (ensemble average)에 16 쌍의 이미지만을 활용하여 불확도가 크다.

본 연구에서는 합성 충돌 제트의 냉각 메커니즘을 파악하기 위해, 제트에서 발생하는 와류의 거동과 형상 변화 관측을 목표로 한다. 스피커의 세기를 조정하여 레이놀즈 수를 변화시키고, *H/D*를 바꾸었을 때 변화되는 와류를 분석한다. 오리피스 출구에서 유동이 분리 (detached)되어 와류가 형성되는 순간부터 와류를 추적하며 속도장, 와도, *Q*-criterion, 순환 (circulation)을 계산하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 합성 제트 생성

실험은 아크릴로 제작된 한 변의 길이가 500mm 인 정육면체 상자에서 진행하였다. 상자 상단에는 합성 제트 액추에이터를 부착하였다. 합성 제트 액추에이터는 서브 우퍼 스피커 (60W max power, 30W RMS power, frequency response 60-5,000 Hz)에 공동과 격자 층을 포함한 415mm 길이 노즐을 결합하여 제작하였다. 스피커의 진동판이 위아래로 진동하면서 생성된 유동은 공동과 격자 층을 통과하여 정류된 제트를 형성한다. 이 유동은 상자 상판으로부터 내부로 55mm 만큼 돌출된 직경 $D = 20\text{mm}$ 의 오리피스를 통해 상자 내로 유입된다. 생성된 합성 제트는 상

자 내부에 수평으로 놓여진 $200 \times 200 \text{ mm}^2$ 크기의 폴리스티렌 (polystyrene) 충돌판 (impingement plate)에 수직하게 충돌한다. 충돌판은 랩 잭 (lab jack)을 이용해 높이를 조절하여 오리피스와의 거리 H 값을 제어할 수 있다. 충돌 합성 제트 유동을 계측하기 위해 상자의 이웃한 두 옆면에 투명한 광학 창을 설치하였다.

2.2 유동장 계측 기법

합성 제트 액추에이터는 입력된 아날로그 신호와 같은 주기의 펄스 제트를 만들어낸다. 이러한 제트에 의해 형성되는 와류를 펄스의 위상에 따라 계측하기 위해, 2차원 위상 동기 (phase-locked) 입자 영상 유속계를 사용하였다. 실험 장치의 모식도를 Fig. 2에 나타내었다.

추적 입자는 $0.3 \mu\text{m}$ 직경의 산화 알루미늄 입자를 사용하였으며, 시더 (seeder)에 보관된 입자가 압축 공기에 의해 사이클론 (cyclone)을 거치며 큰 입자가 제거된 후 실험 상자 내부에 유입된다. 가시화를 위한 레이저는 532nm 파장의 Nd:YAG PIV레이저 (200mJ/pulse, 15Hz)를 사용하였다. 입자 영상은 $2048 \times 2048 \text{ px}^2$, 12 bit 심도의 카메라와 105mm macro 렌즈를 사용해 촬영하였다. 레이저 시트 (laser sheet)는 제트 오리

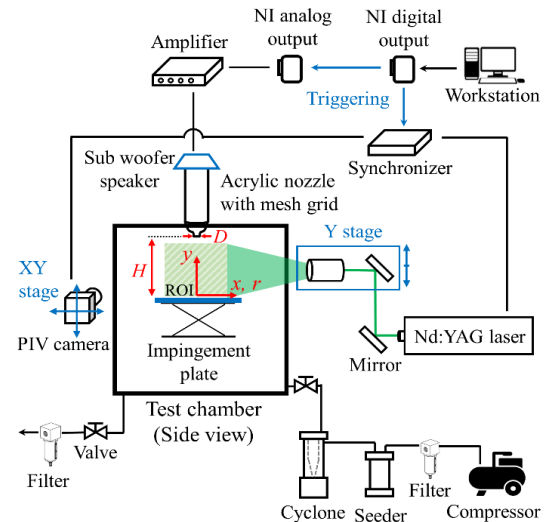


Fig. 2 Experimental setup

피스와 충돌판의 중심선을 지나도록 조사되며, 벽 산란을 줄이기 위해 오리피스와 판에 검정색 테이프를 부착했다. 카메라는 레이저 시트 면에 수직인 방향에서 $44 \times 44 \text{ mm}^2$ 영역을 촬영한다. 레이저 시트 광학계와 카메라는 각각 Y-방향 이송 스테이지와 XY-방향 이송 스테이지를 통해 조절되어 와류의 흐름을 따라 측정 영역을 이동시키며 촬영하였다. 합성 제트 액추에이터와 레이저, 카메라의 위상 동기는 LabVIEW 프로그램과 Timing Hub 싱크로나이저를 통해 제어되어, 특정 위상 시점의 입자 이미지를 10Hz의 속도로 획득하였다.

PIV 시스템에서 촬영한 입자 영상은 공개 소프트웨어인 PIVlab⁽¹²⁾을 사용하여 유동장을 계산하였다. 이미지 전처리는 대비 제한 적응 히스토그램 균일화 (CLAHE: contrast-limited adapted histogram equalization), 하이 패스 필터, Wiener2 잡음 제거 필터를 적용하였다. PIV 분석은 스플라인 상관창 변형 (spline window deformation) 기술⁽¹³⁾을 사용한 고속 푸리에 변환 (fast Fourier transform) 알고리즘을 사용하였고, 상관 영역의 크기는 64px (50% overlap)에서 32px (50% overlap)으로 줄여 나갔다. 계산 결과의 특이치 벡터 (outlier vector) 검출은 표준 편차 필터 (standard deviation filter)와 국소 중간 값 필터 (local median filter)⁽¹⁴⁾를 사용하였다.

2.3 실험 조건

합성 제트 액추에이터에 부착된 스피커는 아날로그 전압 출력 모듈을 통해 제어하였다. 해당 모듈에서 출력되는 100Hz의 사인파 (sine wave) 신호는 파워 앰프에 의해 증폭되어 스피커에 입력된다. 합성 제트의 세기는 파워 앰프의 출력에 따라 변화하며, 앰프의 출력은 0 - 28dB 범위 내에서 조절 가능하다.

본 연구에서는 제트의 세기와 H/D 에 따른 와류의 움직임을 관측하고자 한다. 제트 세기에 따른 변화를 관찰하기 위해 H/D 를 4로 고정하고 앰프 출력을 20, 24, 28 dB로 조정하였으며, H/D 에 따른 변화 관측을 위해 24dB에서 $H/D = 2$,

4, 7로 설정하였다. 각 실험 조건에서 오리피스에 와류 구조가 관측되기 시작하는 위상 시점 ($\varphi = \varphi_0$)을 기준으로 60° 간격으로 유동을 계속하였으며, 총 2.5주기 (900°) 동안 16개의 위상 시점에서 와류의 움직임을 추적하여 촬영하였다. 매 위상 시점마다 500개의 순간 유속 벡터 장을 평균하여 앙상블 평균 유동장을 계산하였고, 이를 와류 분석에 사용하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 합성 제트 레이놀즈 수 계산

합성 제트는 총 질량속을 가지지 않기 때문에 연속 제트와 같은 방법으로 레이놀즈 수를 계산할 수 없다. 제트의 세기를 특성화하기 위해 스트로크 길이 (stroke length) L_0 와 제트 특성 속도 U_0 를 사용한다⁽¹⁵⁾. 스트로크 길이는 진동판의 진동 주기 중 반주기에 해당하는 분출기 (ejection phase) 동안 유체가 분출된 거리를 뜻하며, 아래와 같이 계산된다.

$$L_0 = \int_0^{T/2} U_m(t) dt \quad (1)$$

여기서 $U_m(t)$ 는 제트 오리피스의 공간 평균 유속, T 는 진동판의 진동 주기를 뜻하며, 적분 범위는 분출기의 시작과 끝을 의미한다. $U_m(t)$ 는 오리피스를 지름 방향으로 등분하는 60개 지점의 데이터를 평균하여 계산되었다. 스트로크 길이에 진동수 $f (=1/T)$ 를 곱하여 제트 특성 속도 U_0 를 구하고 (식 (2)), 이를 이용해 합성 제트의 레이놀즈 수를 계산한다 (식 (3)).

$$U_0 = L_0 f \quad (2)$$

$$Re = \frac{U_0 D}{\nu} \quad (3)$$

제트 충돌 실험에 앞서 앰프 출력 20, 24, 28dB 에 해당하는 합성 제트의 출구 유속을 계

Table 1. Characteristics of the synthetic jet actuator

| Amp. (dB) | 20 | 24 | 28 |
|-------------|--------|--------|--------|
| L_0 (m) | 0.0384 | 0.0595 | 0.0678 |
| L_0/D | 1.92 | 2.98 | 3.39 |
| U_0 (m/s) | 3.84 | 5.95 | 6.78 |
| Re | 5120 | 7930 | 9050 |

측하여 스트로크 길이와 레이놀즈 수를 구하였으며, 그 결과를 Table 1에 나타내었다.

3.2 와류 식별 및 정량화

2차원 유동장에서 면과 수직인 방향 (out-of-plane direction)의 와도 성분은 아래와 같이 정의된다.

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (4)$$

여기서 u, v 는 각각 x, y 방향 속도를 뜻한다. 속도성분의 기울기 값을 중심 차분 (central difference)으로 계산하게 되면 PIV 데이터의 노이즈가 증폭되어 부정확한 결과를 얻게 된다⁽¹⁶⁾. 따라서 본 연구에서는 Landreth⁽¹⁷⁾가 제시한 순환 기반의 와도 계산법을 적용함으로써 PIV 노이즈가 감소된 와도장을 얻었다.

한편, 노즐 오리피스 부근이나 충돌판 근처의 영역에서는 전단 흐름 (shear flow)의 영향으로 인해 와도 값이 매우 크게 나타난다. 따라서 또 다른 와류 식별법인 Q -criterion을 함께 적용하였다. Q 값은 3차원 유동장의 속도 기울기 텐서의 두 번째 불변치 (second invariant of the velocity gradient tensor)를 의미하며, 식 (5)와 같이 정의된다. Q -criterion은 와도 텐서 (Ω)의 크기가 변형률 텐서(S)의 크기보다 큰 영역, 즉 Q 가 양수인 영역을 와류로 정의한다⁽¹⁸⁾.

$$Q_{3D} = \frac{1}{2} (\|\Omega\|^2 - \|S\|^2) > 0 \quad (5)$$

2차원 PIV에서는 면의 방향 속도 성분과 기울기를 알 수 없기 때문에, 아래와 같이 수정된 Q 를 사용해 와류를 식별한다⁽¹⁹⁾.

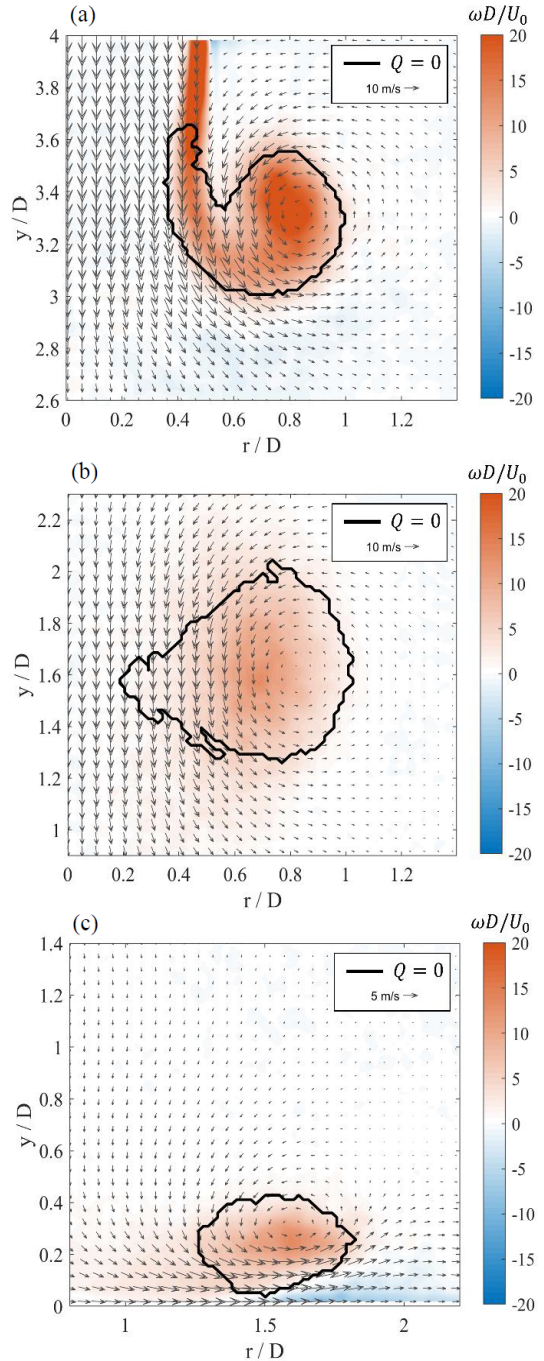


Fig. 3. Ensemble averaged velocity and vorticity fields with vortex identification criteria at three different phases (a) $\varphi - \varphi_0 = 60^\circ$, (b) $\varphi - \varphi_0 = 140^\circ$, and (c) $\varphi - \varphi_0 = 480^\circ$ ($H/D = 4$, $Re = 9050$).

$$Q = \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 > 0 \quad (6)$$

본 연구에서는 계측한 유동장에 식 (6)의 2차원 Q -criterion을 적용하여 와류에 해당하는 영역을 식별하였다.

Fig. 3은 $H/D = 4$ 이고 $Re = 9050$ 인 실험 케이스의 세 가지 위상에 대한 이상불 평균 속도장과 그로부터 계산한 와도 컨투어 (contour), 그리고 $Q = 0$ 인 와류의 경계선을 나타낸 것이다. Fig. 3(a)는 위상 $\varphi - \varphi_0 = 60^\circ$ 의 와류가 발생하고 얼마 지나지 않은 시점으로, 출구에서 빠르게 방출되는 제트로 인해 오리피스의 경계 ($r = 0.5D$)에서 강한 전단 흐름이 발생하여 높은 와도 값이 나타남을 볼 수 있다. Q -criterion으로 식별한 와류의 형상 역시 주 흐름의 영향으로 꼬리가 길게 발달해있다. 시간이 지나면 Fig. 3(b)와 같이 와류가 전단 흐름에서 벗어나 원형에 가까운 형태가 되어 진행한다. 더욱 진행하여 관에 충돌한 이후에는 Fig. 3(c)와 같이 와류의 형상이 납작하게 변형되며, 진행방향 하부에 반대 방향의 와류가 발생한다. 이 현상은 합성 제트를 사용한 충돌 냉각 효율과 밀접한 연관이 있다⁽¹⁰⁾.

Fig. 4는 양의 Q 값을 가지는 와류 영역만을 식별하여 위상에 따라 와도 컨투어를 그린 것으로, 2.5주기동안 와류의 생성과 진행, 충돌 후 소

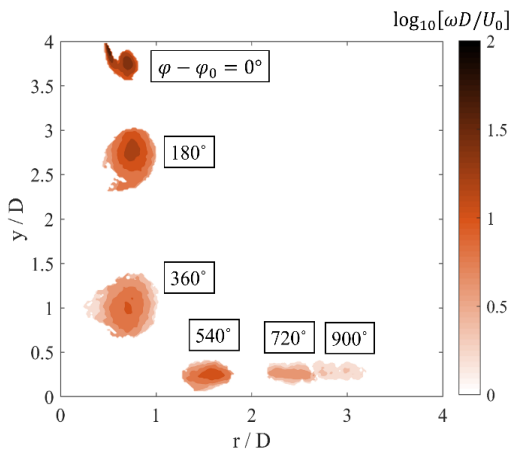


Fig. 4. Vorticity contours of the vortices identified by Q -criterion ($H/D = 4$, $Re = 9050$).

산까지의 과정을 반 주기 간격으로 표시하였다. 와류가 생성되어 발달하면서 꼬리가 사라지고 납작해지면서 와도의 크기가 감소하며, 충돌 후에는 형태가 납작해지며 세기가 약해지는 것을 확인할 수 있다.

3.3 와류 이송 경로

위상에 따른 와류의 이동 경로를 H/D 와 레이놀즈 수에 따라 계산하였다. 와류의 중심점은 전단 영역을 제외하고 와도 값이 최대가 되는 지점으로 결정하였다.

Fig. 5는 합성 제트의 레이놀즈 수를 7930으로 고정시키고 H/D 를 변화시켜 가며 와류 중심의 이동 경로를 60° 의 위상 간격으로 그린 것이다.

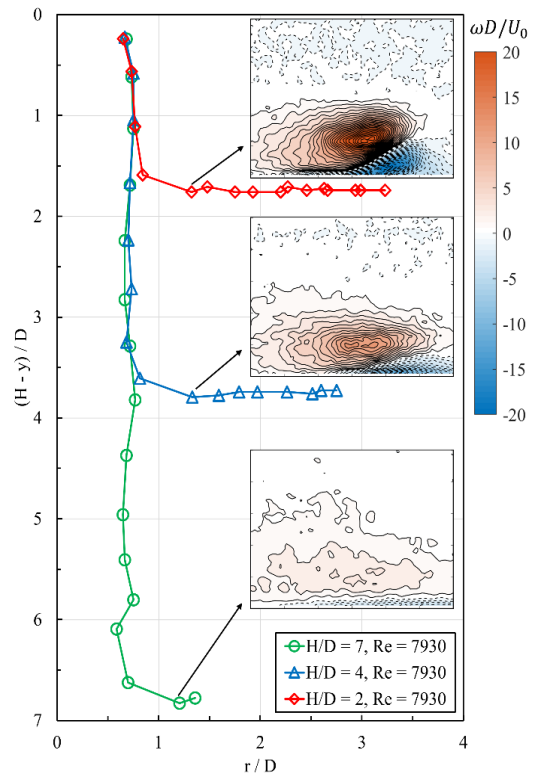


Fig. 5. Trajectory of vortex for various H/D at constant Reynolds number, and vorticity contours at the phase corresponding to vortex impingement. Negative vorticity contours are represented by dashed lines.

동일한 레이놀즈 수의 제트를 사용하였기 때문에 와류가 판에 충돌하기 이전에는 유사한 움직임을 보인다. 이 구간에서는 와류의 이송 속도가 각 케이스마다 거의 균일하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 와류가 판에 충돌한 이후에는 수평 방향으로 이송되며, 그 속도는 수직 방향으로의 이송에 비해 크게 줄어든 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 H/D 값에 크게 관계없이 모든 케이스에서 비슷한 결과를 얻었다.

Fig. 5의 컨투어는 와류가 표면에 충돌하는 위상 시점에서 와도를 나타낸다. 해당 그림에서는 두 가지 주목할 만한 현상을 관찰할 수 있다. 첫째는 H/D 가 작을수록, 고체 표면과 주 와류 사이에 강한 역회전 와류 (counter rotating vortex)가 발생한다. 이는 고체 표면에서 점착 조건 (no-slip boundary condition)에 의한 역압력구배가 발생하기 때문이다^(20, 21). 역회전 와류의 영향으로 주 와류의 이동 경로가 위로 떠오르게 된다. 두 번째는 와도의 크기 변화이다. $H/D = 2$ 인 경우에는 와도의 극대점이 뚜렷하고 크기가 큰 값들이 극대점 주변으로 밀집되어 있는 반면, H/D 가 증가할수록 주 와류의 에너지가 주변부로 소산

되어, 합성 제트가 가진 주 와류의 특성을 많은 부분 잃게 된다.

Fig. 6은 H/D 를 4로 고정하고 제트의 레이놀즈 수를 변화시켰을 때의 와류 이동 경로를 나타낸 것이다. 레이놀즈 수가 작아질수록 제트의 유속이 감소하므로, 와류의 이동이 전체적으로 느리게 진행되며 판과 와류의 충돌 또한 천천히 발생한다. 더불어, 레이놀즈 수가 가장 낮은 $Re = 5120$ 의 경우 와류가 중심축 ($r/D = 0$)에 더 가까이에서 낙하함이 관찰된다. Fig. 6의 컨투어는 와류가 표면에 충돌했을 때 와도장을 나타낸 그림이다. Fig. 5에서와는 다르게 각 케이스마다 크기 차이가 있을 뿐, 구조적인 차이는 관찰되지 않았다. 즉, 표면에서 발생하는 역회전와류의 구조는 H/D 에 민감하게 변화하며 레이놀즈 수에는 큰 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다.

3.4 와류 세기의 변화

각 위상 시점의 와류 세기는 순환 값으로 정량화하였다. 순환은 와류 영역 (A)을 감싸는 폐곡선 (C)을 따라 속도 벡터를 선적분한 값으로 정의되며, 스토크스 정리를 통해 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Gamma = \oint_C \vec{u} \cdot d\vec{l} = \int_A w \cdot dA \quad (7)$$

와류 영역은 3.2절에서 설명한 Q -criterion을 통하여 양의 Q 값을 가지는 영역으로 구분했으며, 영역 내의 와도를 면적분하여 순환을 계산하였다.

Fig. 7은 H/D 의 값이 4로 고정되어 있고 레이놀즈 수가 다른 케이스에 대하여 와류의 순환 값과 수직 위치를 위상에 따라 도시한 그래프이다. 오리피스에서 와류가 발생한 시작 시점 ($\varphi - \varphi_0 = 0^\circ$) 부터 초기 ($\varphi - \varphi_0 = 60^\circ \sim 120^\circ$)까지는 와류가 발달하면서 순환이 증가하는 경향이 공통적으로 관찰된다. 와류의 발달이 끝나고 전단 흐름의 영향에서 벗어난 후부터는 와류가 주 흐름을 따라 낙하하면서 세기가 서서히 줄어

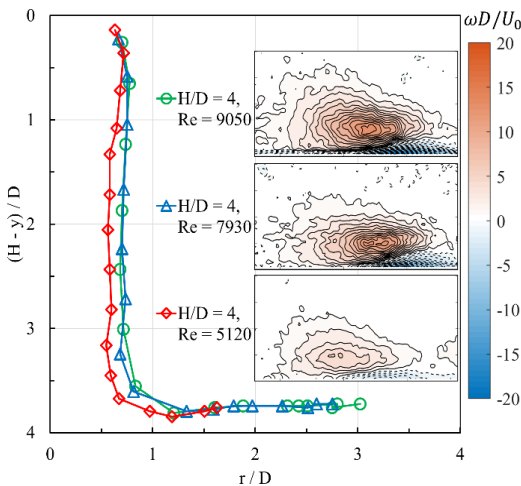


Fig. 6. Trajectory of vortex for various Reynolds numbers at constant H/D , and vorticity contours at the phase corresponding to vortex impingement. Negative vorticity contours are represented by dashed lines.

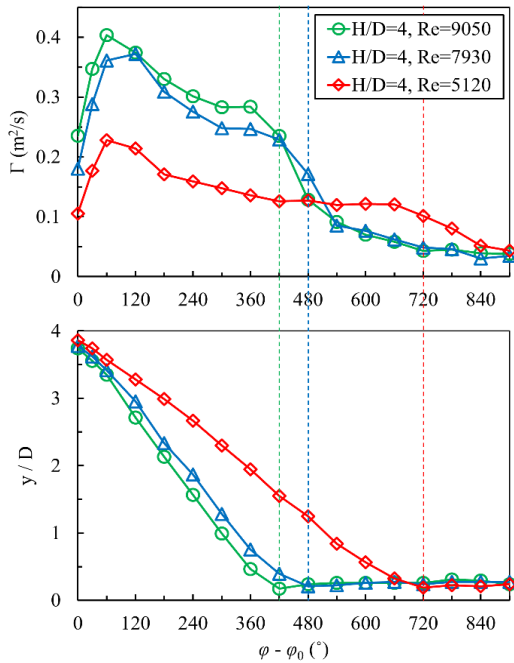


Fig. 7. Phase-resolved evolution of (a) the circulation intensity and (b) vertical location of the vortex for fixed $H/D = 4$.

든다. 이후 y/D 가 0에 가까워져 더 이상 감소하지 않게 되는 시점, 즉 와류가 판에 충돌하는 순간이 되면 세기가 급격하게 감소한다 (세로 파선). 충돌 후의 와류는 수평방향으로 이동하면서 다시 천천히 세기가 감소하며 소산하게 된다.

4. 결론

본 연구에서는 합성 제트의 세기와 오리피스-충돌판 사이 거리 (H/D)에 따른 와류의 특성과 움직임의 변화를 분석하였다. 각 파라미터의 효과를 파악하기 위해 H/D 가 4일 때 제트 Re 를 5120, 7930, 9050 설정하였으며, Re 가 7930 일 때 H/D 를 2, 4, 7로 설정하여 총 6가지 경우에 대해 위상 동기 PIV를 활용한 실험을 진행하였다. 합성 제트에서 생성되는 와류의 식별과 정량화는 와도, Q -criterion, 순환 값을 이용하여 계산하였다.

제트에서 발생하는 와류는 다음의 세 가지 단

계를 거친다.

1. 오리피스에서 유동이 분리될 때 벽면의 강한 전단에 의해 높은 와도 값을 가지는 꼬리가 생성됨.

2. 와류가 오리피스에서 완전히 분리되어 수직 방향으로 이송되면서 꼬리가 소멸하고 원형 와류 형성.

3. 와류가 벽면에 충돌하면서 그 모양이 타원 형태로 변형되고, 벽면과의 사이에 역방향 회전 와류 (counter rotating vortex)가 생성, 벽면을 따라 수평 방향으로 이동.

충돌 전 와류의 이송 경로는 H/D 와는 큰 연관성이 없게 나타났으며, 레이놀즈 수가 가장 작은 경우에는 제트 중심에 가까운 경로를 가졌다. 와류가 벽면에 충돌했을 때 발생하는 역방향 회전 와류는 H/D 가 작을수록 크게 발달하였으나, 레이놀즈 수에 따라서는 와도 값의 크기 차이는 존재하지만 구조적 차이는 발생하지 않았다. 또한 와류와 벽면 사이에 충돌이 발생했을 때 순환 값으로 정량화한 와류의 세기가 급격하게 감소하는 경향을 보였다.

후 기

이 논문은 2019 년도 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2017R1A2B4007372)

REFERENCE

- 1) Han, B. and Goldstein, R., 2001, "Jet-impingement heat transfer in gas turbine systems", Ann. N.Y. Acad. Sci., Vol. 934, pp. 147-161.
- 2) Han, J.C., Dutta, S. and Ekkad, S., 2012, Gas turbine heat transfer and cooling technology, CRC press.
- 3) Hollworth, B. and Durbin, M., 1992, "Impingement cooling of electronics", J. Heat Transfer, Vol. 114, pp. 607-613.
- 4) San, J.Y., Huang, C.H. and Shu, M.H., 1997, "Impingement cooling of a confined circular air

- jet", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, pp. 1355-1364.
- 5) Jambunathan, K., Lai, E., Moss, M. and Button, B., 1992, "A review of heat transfer data for single circular jet impingement", *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 13, pp. 106-115.
 - 6) Glezer, A. and Amitay, M., 2002, "Synthetic jets", *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 34, pp. 503-529.
 - 7) Lasance, C.J. and Aarts, R.M., 2008, Synthetic jet cooling part I: overview of heat transfer and acoustics, in: 2008 Twenty-fourth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, IEEE, pp. 20-25.
 - 8) Chaudhari, M., Puranik, B. and Agrawal, A., 2010, "Heat transfer characteristics of synthetic jet impingement cooling", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 1057-1069.
 - 9) Pavlova, A. and Amitay, M., 2006, "Electronic cooling using synthetic jet impingement", *J. Heat Transfer*, Vol. 128, pp. 897-907.
 - 10) Silva-Llanca, L. and Ortega, A., 2017, "Vortex dynamics and mechanisms of heat transfer enhancement in synthetic jet impingement", *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 112, pp. 153-164.
 - 11) Valiorgue, P., Persoons, T., McGuinn, A. and Murray, D., 2009, "Heat transfer mechanisms in an impinging synthetic jet for a small jet-to-surface spacing", *Exp. Therm. Fluid Sci.*, Vol. 33, pp. 597-603.
 - 12) Thielicke, W. and Stamhuis, E., 2014, "PIVlab-towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB", *J. Open. Res. Softw.*, Vol. e30.
 - 13) Scarano, F., 2001, "Iterative image deformation methods in PIV", *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 13 pp. R1.
 - 14) Westerweel, J. and Scarano, F., 2005, "Universal outlier detection for PIV data", *Exp. Fluids*, Vol. 39, pp. 1096-1100.
 - 15) Smith, B. and Swift, G., 2003, "A comparison between synthetic jets and continuous jets", *Exp. Fluids*, Vol. 34, pp. 467-472.
 - 16) Westerweel, J., 1995, Digital particle image velocimetry: Theory and application, in, Delft University, the Netherlands.
 - 17) Landreth, C.C. and Adrian, R.J., 1990, "Impingement of a low Reynolds number turbulent circular jet onto a flat plate at normal incidence", *Exp. Fluids*, Vol. 9, pp. 74-84.
 - 18) Hunt, J.C., Wray, A.A. and Moin, P., 1988, Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows, in: Proc. 1988 Summer Program of the Center for Turbulence Research, pp. 193-208.
 - 19) Chen, Q., Zhong, Q., Qi, M. and Wang, X., 2015, "Comparison of vortex identification criteria for planar velocity fields in wall turbulence", *Phys. Fluids*, Vol. 27 pp. 085101.
 - 20) Butler, K.M., 1993, Estimation of wake vortex advection and decay using meteorological sensors and aircraft data, in, Massachusetts Inst. of Tech. Lexington Lincoln Lab.
 - 21) Xu, Y., He, G., Kulkarni, V. and Wang, J., 2017, "Experimental investigation of influence of Reynolds number on synthetic jet vortex rings impinging onto a solid wall", *Exp. Fluids*, Vol. 58 (1) pp. 6.